

廢水處理

載體混凝技術應用於水處理的原理 與技術評析

江舟峰*、陳建安**、陳恆揚***

摘要

載體混凝技術係指將高分子膠凝劑，塗佈於高密度大粒徑 ($2.2 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$ 、 $45 \sim 600\mu\text{m}$)的顆粒，以吸附污泥方式，增加整體膠羽結構的比重，以改善污泥沉降性與穩定性。本文彙整國外文獻及本研究群過去六年研究成果，探討該技術的原理，並針對載體種類、特性、處理水體、評估方式與評估指標進行案例評析，並探討商轉技術的應用。

本研究群在國科會支助下，研發一種不同理論的載體嵌合技術，使用小粒徑載體 ($1\text{-}10\mu\text{m}$)，直接嵌入污泥結構內，增加其整體密度；並以自行開發的光柵沉降儀，進行實場造紙廢水活性污泥測試。結果顯示該沉降儀可大幅降低 $1,000\text{mL}$ 量筒的管壁效應，且可有效改善放流水質與污泥沉降性，但目前仍限於批次試驗，未來仍應以連續式沉降試驗，於現場進行前導場評估。

【關鍵字】載體混凝、載體嵌合、沉降實驗

*中國醫藥大學環境醫學研究所 教授

**中國醫藥大學環境醫學研究所 碩士生

***永豐餘工業用紙股份有限公司成功廠 環保股股長

一、前　　言

載體混凝 (ballasted flocculation)，為一種改善水處理效能的快速沉澱法，其原理為進行混凝階段時，將細砂等高密度的載體，加入污泥膠羽體中，形成高密度的膠羽顆粒，進而增進活性污泥的沉降性。載體混凝技術自 1964 開始研究以來^[1]，經過多年研究漸臻成熟，已成為改善廢污水處理效能的主要選項。本研究群自 2000 年，在國科會支助下，研發一種不同理論的載體嵌合 (carrier docking) 技術，並利用造紙廢水活性污泥進行多年實証測試。本文旨在探討載體混凝及載體嵌合的原理，並彙整評析國外文獻暨本研究群過去的研究成果，包括載體種類、載體特性、適用水體、成效評估方法與評估指標等 5 項，並探討實例與商轉技術。

二、原　　理

2.1 載體混凝原理

載體混凝原理為水處理過程中，於混凝階段時加入載體，形成高密度膠羽結構進而改善其沉降特性^[2]；載體材質主要為細砂，其他有滑石、煤粉等。載體混凝作用機理如圖 1 所示，將載體表面包覆高分子膠凝劑後，吸附污泥膠羽顆粒，進一步透過架橋作用形成載體膠羽，載體膠羽間可相互連結，形成更大的膠羽結構，提昇污泥沉降速度。此一機理較適合淨水處理，水體濁度較低，使用較大粒徑 (45~600μm) 需回收之載體。

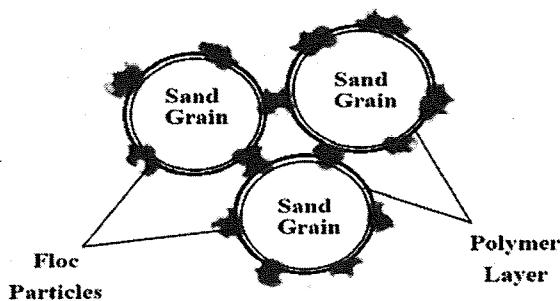


圖 1 載體混凝作用機理示意圖 (Metcalf and Eddy, 2003)

2.2 載體嵌合原理

本研究群所研發之載體嵌合技術的作用機理如圖 2 所示，使用較小粒徑載體($1\sim10\mu\text{m}$)，在膠羽結構內以凡得瓦力(van der waals force)或包陷(entrapment)等方式，將載體嵌入不特定結合位址，增加膠羽結構之外觀密度。此理論較適合高濃度的活性污泥，本研究群首創“載體嵌合”的名詞，並認為較能描述實際的物化現象。圖 3 為本研究團隊拍攝之 400 倍光學顯微鏡圖，所觀察到黑色點為嵌合於生物膠羽之載體，該載體係以特殊程序淘洗(elutriation)所得，密度為 2.26 g/cm^3 ，粒徑為 $1\sim10\mu\text{m}$ ，低於淨水處理所用細砂的密度($2.65\sim2.7\text{ g/cm}^3$)及粒徑($45\sim150\mu\text{m}$)。

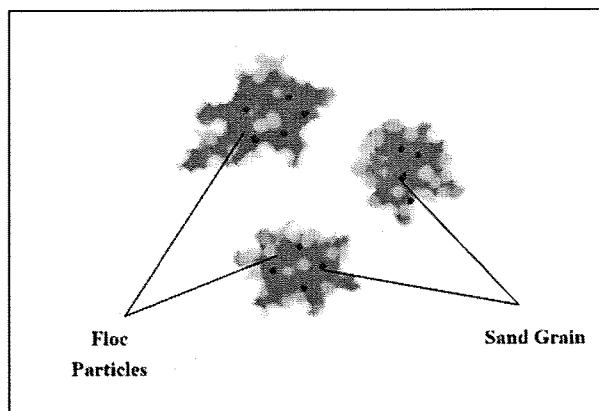


圖 2 載體嵌合作用機理示意圖 (蔡, 2004)

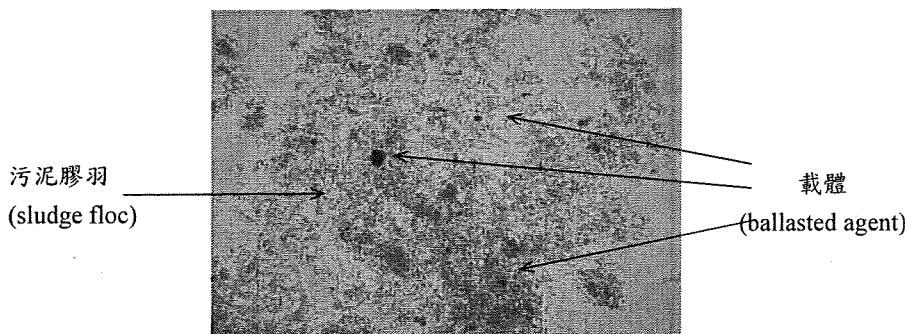


圖 3 添加載體之活性污泥膠羽 (400 倍) (蔡, 2004)

三、載體混凝技術評析

3.1 文獻評析

表 1 彙整國外文獻及本研究群重要研究成果，Clauss 等^[3]將載體混凝技術應用於造紙廢水處理，嘗試利用滑石載體解決污泥膨化問題，可於 24 小時內，將污泥容積指數由 280 降至 160 mL/g，降幅度達 43%，且降幅與載劑量呈正相關；但當滑石劑量降至 25% 時，對 SVI 無明顯改善效果。Jeschke 及 Hansen^[4]採用具專利技術之 Actiflo 處理程序，應用於自來水廠的水質處理，結果顯示處理後水質平均濁度由 0.60 降至 0.036 NTU，改善幅度達 94%；而三鹵甲烷濃度亦由 70 降到 50 痘/L，且化學劑量減少 28%。

表 1 載體混凝技術歷史沿革與重要研究成果

參考文獻	研究目的	研究成果
Clauss et al. (1999)	以滑石改善造紙廢水活性污泥沉降性	1. 載體劑量為 70% 時，SVI 可由 280 降至 160 mL/g，但產生過量污泥
Jeschke & Hansen (1999)	Actiflo 程序用於淨水處理	1. 載體劑量為 9.59 g/L 時，平均濁度由 0.6 降至 0.036 NTU 2. 混凝劑用量降低 28%
Vanderhasselt et al. (1999)	開發新型 Settrometer 與 Schluemosed 評估工具	1. 滑石改善污泥沉降性效果優於煤粉 2. 膠凝劑改善上層液透明度成效較載體為佳 3. 應以多種參數評估活性污泥沉降性，以避免錯誤之成效評估
Vanderhasselt et al. (1999)	以 Settrometer 評估兩種載體之改善成效	1. 滑石對於不同活性污泥皆可改善其沉降性，添加 15 小時內可達穩定效果 2. 膠凝劑提昇活性污泥初始沉降速度約為滑石的 3 倍，但只能維持 4 小時 3. 滑石添加比例較高，易產生過量污泥
Seka et al. (2001)	評比複合載體與單一載體改善成效	1. 以滑石、膠凝劑、殺菌劑組成的複合載體可促進污泥沉降速度，並可破壞絲狀菌 2. 具短期及長期的功效，改善傳統載體添加次數及添加量過多的缺點
Desjardins et al. (2002)	探討改良式瓶杯試驗是否能準確評估載體混凝技術應用於實廠之成效	1. 可有效評估載體混凝技術應用於實廠之成效 2. 載體、膠凝劑、混凝劑劑量與 pH 為影響混凝成效之重要因素

表 1 載體混凝技術歷史沿革與重要研究成果(續)

參考文獻	研究目的	研究成果
Kessler et al. (2002)	評估載體混凝技術於不同進流條件下是否能有效去除鋼鐵廢水中總懸浮微粒油脂和特定金屬	1.於溢流率為 25 以及 75 gpm/ft ² 的進流條件下，仍可有效改善放流水質 2.TSS 平均去除率達 96%，油脂去除率為 92%，放流水的銅及鎳含量分別低於 6.1 及 20 µg/L
Young et al. (2003)	探討載體膠羽形成機理及影響載體膠羽大小和沉降性之因子	1.載體膠羽具高沉降速度乃導因於密度增加且於高混合速率時而不易崩解 2.最佳載體劑量隨著進流水濁度、混凝劑和膠凝劑量的不同而變動
蔡等(2003)	以量筒批次沉降試驗評估細砂載體嵌合技術改善造紙廢水活性污泥沉降性	1.載體重量比為 8.5 和 43 % 時，初始沉降速度分別增加 11 及 244 % 2.載體的添加可提昇 COD 處理成效達 7 ~ 22%，扣除添加載體溶液之稀釋效果後，仍有明顯改善成效 3.建議載體重量比建議應小於 20 %
江等(2005)	利用新型光柵式沉降管柱，評估細砂載體成效	1.初始沉降速度由 68 增至 127 % 2.載體重量比由 8 增至 42 % 時，扣除稀釋效應後，初始沉降速度由 63 增至 98 % 3.但對放流水 SS 及 COD 無改善成效 4.建議載體重量比應為 10 % 以下

Vanderhasselt^[5]以具專利之管柱 Settrometer 及 Schluemosed，評估添加滑石、煤粉及高分子膠凝劑，對不同污泥沉降的影響，結果顯示滑石初始沉降速度較碳粉高出 15 ~ 28%，且污泥層高度(mL/L)比碳粉減少 3 ~ 35%，膠凝劑對上澄液透明度改善效果最佳，最高達 71%；同時亦發現改善成效與污泥種類有關，因此評估載體成效時，應採用 2 種以上的指標，以增加評估結果之正確性。Vanderhasselt 及 Verstraete^[6]另以 Settrometer 評估滑石與高分子膠凝劑，對工業廢水及生活污水活性污泥的改善成效，結果指出滑石與膠凝劑對於 2 種污泥之初始沉降速度、SVI 及攪拌 SVI (stirred sludge volume index, SSVI) 皆有正面成效，且滑石的改善成效可維持 15 小時，但膠凝劑則不及 3 小時；該研究亦指出改善效果與劑量呈線性正相關 ($R^2 = 0.92 \sim 0.99$)，但改善程度受污泥種類影響，但滑石的缺點是導致污泥增加。

Seka 等^[7]採用複合載體 (multi-component additive)，應用於不同污泥。以不同

配比之滑石、膠凝劑、殺菌劑，可減少污泥之 30 分鐘量筒沉降體積 (SV_{30})，並具有破壞絲狀菌的功能。此外單次添加 120 小時後，改善成效仍優於滑石載體，因此推論複合載體較滑石載體更具長效性，且複合載體除可改善沉降性外，更可改善滑石添加次數及添加劑量過多的缺點。

Desjardins 等^[8]以改良式瓶杯試驗模擬 Actiflo 程序，探討載體混凝技術影響淨水處理的成效因子，結果指出該評估方法可有效預測實場的處理效能，並發現載體與混凝劑的劑量及混凝階段之 pH 值為重要影響因子。Kessler^[9]亦探討 Actiflo 程序應用於鋼鐵廢水，結果發現當表面溢流率為 25 及 75 gpm/ft² 時，總懸浮固體(TSS) 平均去除率達 96%，油脂的平均去除率為 92%，放流水銅、鎳濃度分別低於 6.1 及 20 痘/L，並推論進流條件變動對載體混凝成效影響不大。Young 及 Edward^[10] 探討載體膠羽的形成與影響載體膠羽大小及沉降性的因子，結果指出載體膠羽的形成機理與一般膠羽類似，但載體膠羽具有高沉降速度的主因在於載體膠羽密度較高，且載體膠羽在一定混合速率下可形成較大、較圓的結構而不易崩解，而最佳劑量隨著處理水體的濁度、混凝劑劑量和膠凝劑劑量改變而不同。

如表 1 所示，載體混凝技術用於改善污泥沉降性或放流水質，文獻中使用不同種類載體、評估工具與方法，適用廢水種類亦不同，綜合歸納如下：

1. 載體混凝的應用處理範圍廣泛，跨及淨水、工業廢水、生活污水等領域，歷經 30 年研究已發展出商業運轉技術，但可能因成本及評估方法仍有疑義，應用於廢污水處理仍未能普及。
2. 實驗室規模之評估顯示，對於放流水質與沉降性皆有正面效果，適用於土地面積不足的終沉池功能提昇，唯改善程度依廢水特性、載體特性、混凝劑量、膠凝劑量的差異而不同；一般而言，沉降改善程度與載體劑量呈正相關。
3. 鑑於評估工具與方法仍未臻成熟，本研究群開發線上監測沉降管柱，探討如何正確評估沉降改善成效，並能實證低成本之小粒徑細砂載體，可大幅改善污泥沉降性(127 ~ 244 %)。

3.2 評估方法與參數

載體混凝技術歷經 30 餘年研究與發展，衍生出多種評估工具與方法，不同技術主要差異在於載體種類、劑量、適用水體以及評估工具與評估指標，以下逐一討

論。

3.2.1 種類與特性

如表 2 所示，載體材質主要有滑石、細砂、煤粉等 3 類，至於複合材質的特性，因文獻並未詳加說明，但其中 98.5% 為滑石，因此可將之歸類於滑石材質。載體的特性主要從密度、粒徑及可回收性等 3 方面考量；在密度方面，以滑石之 2.8 g/cm^3 最高，其次為細砂之 2.65 g/cm^3 ，而本研究群所用載體是淘洗過的細砂，密度為 2.26 g/cm^3 ，較一般細砂低，而煤粉密度為 1.5 g/cm^3 最低；至於粒徑以煤粉 600 瘦 最大，細砂 45 ~ 150 瘦 居次，滑石 38 ~ 100 瘦 略小於細砂。本研究群的淘洗細砂藉由顯微鏡，及計數玻片量測，估計為 1 ~ 10 瘦，是過去所有研究中最小的，低成本且不需回收。而細砂較昂貴須回收，其他滑石、碳粉等則不需回收，回收式載體的優點為可節省購置成本，但缺點為需加裝回收設備且載體價格較貴；而拋棄式載體則無上述缺點，但載體特性將影響需添加的劑量，過高劑量可能導致大量污泥，增加污泥處理成本。本研究團隊期能研發低成本、不需回收，、低劑量之載體配方，以達預期處理成效。

表 2 載體混凝土技術評估方法與試驗參數評比表

試驗參數	Clauss et al. (1999)	Jeschke et al. (1999)	Vanderhasselt et al. (1999)	Vanderhasselt et al. (1999)	Seka et al. (2001)
載體種類	滑石 (talc)	細砂	滑石 煤粉	滑石	滑石 複合載體
商轉技術	N/A	Actiflo	N/A	N/A	N/A
密度	2.8 g/cm^3	N/A	T : 2.8 g/cm^3 C : 1.5 g/cm^3	2.8 g/cm^3	N/A
粒徑	N/A	45-150瘦	T : 38瘦 C : 600瘦	<100瘦	N/A
回收	不需	需要	不需	不需	不需
劑量	70 % (w/w)	9.59 g/L	42 ~ 86 % (w/w)	$0.5 \sim 8.5 \text{ (g/L)}$	複合:50 ~ 67 % (w/w) 滑石:80 ~ 100 % (w/w)
水體種類	造紙廢水	自來水 (2-10 NTU)	生活廢水 蛋加工廢水 蕃茄廢水	生活廢水 製藥廢水	食物廢水 蔬菜廢水 造紙廢水

表 2 載體混凝技術評估方法與試驗參數評比表(續)

試驗參數	Clauss et al. (1999)	Jeschke et al. (1999)	Vanderhasselt et al. (1999)	Vanderhasselt et al. (1999)	Seka et al. (2001)
評估方式	人工取樣， 量筒批次試 驗	N/A	使用自動監測 沉降工具進行 批次沉降試驗	使用自動監測 沉降工具進行 批次沉降試驗	瓶杯試驗 (Jar-test)
評估指標	污泥體積指 數(SVI)	濁度 三鹵甲烷 (THM)	攪拌污泥容積 指數(SSVI) 初始沉降速度 上澄液濁度	污泥容積指數 攪拌污泥容積 指數(SSVI) 初始沉降速度	30 分鐘沉降 體積(SV ₃₀)

N/A : Not available

試驗參數	Desjardins et al. (2002)	Kessler et al. (2002)	蔡等 (2003)	Young et al. (2003)	江等 (2005)
載體種類	細砂	細砂	淘洗細砂	細砂載體	淘洗細砂
商轉技術	Actiflo	Actiflo	N/A	N/A	N/A
載體特性					
密度	2.7 g/cm ³	N/A	2.26 g/cm ³	2.65 g/mL	2.26 g/cm ³
粒徑	45-150 瘦	45-150 瘦	1-10 瘦	75-300 瘦	1-10 瘦
回收	需要	需要	不需	需要	不需
劑量	1 ~ 7g/L	3 ~ 5 g/L	8~43% (w/w)	0 ~ 5 g /L	8~ 42 % (w/w)
水體種類	自來水	鋼鐵廢水	造紙廢水	N/A	造紙廢水
評估方式	改良式 瓶杯試驗	前導廠測試	1L 量筒 批次試驗	瓶杯試驗	光柵式沉降管 柱批次試驗
評估指標	濁度 總有機物 (TOC)	懸浮固體 油脂 金屬濃度	初始沉降速度 懸浮固體 化學需氧量	沉降時間 (T, s) 濁度	初始沉降速度 懸浮固體 化學需氧量

N/A : Not available

3.2.2 劑量與處理水體

如表 2 所示，載體混凝技術已被評估於各類水體，包括淨水、生活污水及各種工業廢水，但評估技術僅限於批次沉降方法，且載體配方與製造技術尚未成熟，本研究群自行研發之載體嵌合技術，目前僅限於造紙廢水，係考量造紙廢水富含不易分解纖維質，生物膠羽體呈絲狀結構，不易沈降，容易導致污泥膨化的問題。

如表 2 所示，文獻使用的載體劑量受載體或水體種類影響，且使用之劑量單位亦不同，如以水體體積為計算基礎之 g/L，也以污泥質量與體積為計算基礎之 g/g MLSS，及 g/L MLSS。本研究群認為將載體重量除以污泥質量再乘以 100%，計算出載體與污泥之重量百分比 (w/w) 較為合理，因為載體係直接嵌入污泥中，理論上所需劑量應與污泥乾基量呈正比，如細砂劑量為 3 ~ 10 g/L，滑石劑量為 42 ~ 100 % (w/w)，複合載體為 50 ~ 67 % (w/w)，本研究群淘洗細砂劑量為 10 ~ 42 % (w/w)。

3.2.3 評估工具與方法

如表 2 所示，載體混凝技術可應用於淨水與廢水 2 類。評估淨水處理效果的方法通常採用瓶杯試驗，評估指標為濁度及總有機碳或是三鹵甲烷。廢水處理成效評估則因廢水種類及特性差異較大，評估工具歷經不斷改良，實驗室規模評估如傳統量筒批次沉降，或採即時監控設備如 Settlometer 及 Schlumoset，本研究群自行研發光柵式沉降管柱，評估工具雖不同，但皆為批次式沉降；若能以連續操作進行，更準確評估載體混凝處理成效。本研究群另自行開發連續式 LGSL (continuous-light grid settling column, C-LGSC)，配備污泥進流馬達及動力攪拌手，可有效減少管壁效應，模擬實場連續操作，並利用程控式光柵，判讀污泥沉降界面高度，期能有效評估沉降改善成效；此為下一期程之研究。

文獻中最普遍使用的評估工具為 1L 量筒，利用污泥容積指數評估污泥沉降性。此評估方法並不適當，特別是當污泥濃度過高 (> 10,000 mg/L) 時，可能因管壁效應 (wall effect) 而低估污泥之沉降性，因此若 SVI 大於 250 mL/g 時，污泥需經適當稀釋方可進行 SVI 試驗。由於量筒內徑較小，污泥顆粒易與管壁摩擦，產生阻滯力降低污泥沉降速度，造成低估污泥沉降速度，此現象則稱為管壁效應，將嚴重影響載體的成效評估，為改善此一缺點，應於實驗進行中，利用攪拌棒 (stirring rod) 小心慢速攪拌 (1.3 cm/min)，以減低管壁效應，其指標則稱為攪拌污泥容積

指數 (stirred sludge volume index, SSVI)。

除 1L 量筒外，文獻亦使用不同試驗工具及評估方法，以具專利技術之 Settrometer^[13] 及 Schlumosed^[14] 2 種設備最為先進。Settrometer 為容量 10L 的玻璃管柱，高 70 cm，直徑為 14 cm，可即時監測污泥沉降性。作用機制如圖 4 所示，管柱外圍裝置發射光源，以掃描器沿著管柱上下移動，再根據接收光源強度判讀沉降高度及時間，管柱內設有較快的攪拌速度 (13 cm/min) 以減少管壁效應，可利用電腦接收訊號，並繪成沉降高度對沉降時間曲線圖，推算出最大初始沉降速度 (maximum initial settling velocity)，並以污泥層高度計算 SSV，作為污泥沉降特性評估指標。

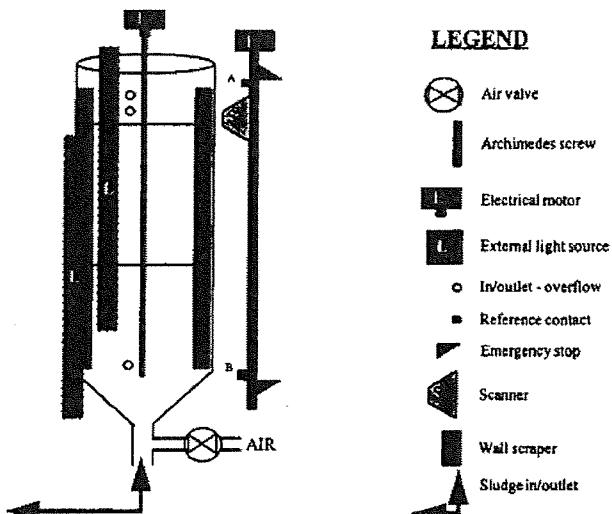


圖 4 Settrometer 作用機制示意圖 ^[13]

Schlumosed 作用機制如圖 5 所示，直徑及高度分別為 3 與 32 cm，亦利用光學原理量測污泥沉降，Schlumosed 配有 3 個固定光源感應器，可於沉降時，判讀接收之光源強度 (light intensity, LI_{sludge})，並以淨水之接收光源強度為背景值 (LI_{ref})，量測沉降完成後上澄液之透明度 (transparence, T)，作為污泥沉降特性評估指標，透明度計算公式如下：

$$T \% = \frac{LI_{sludge}}{LI_{ref}} \times 100$$

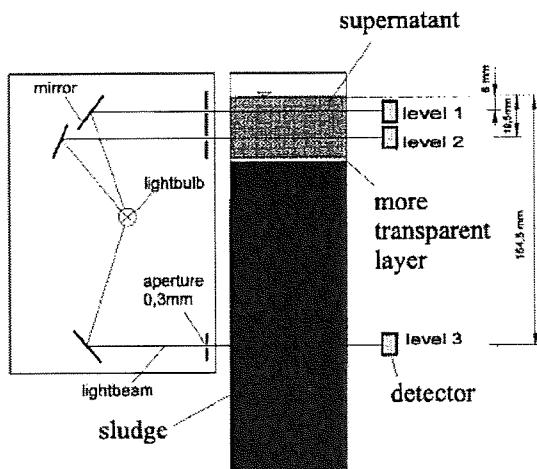


圖 5 Schlumosed 作用機制示意圖^[14]

3.2.4 本研究群試驗工具與評估方法

為評估載體嵌合技術之應用成效，採用正確的沉降工具相當重要，本研究群採用之評估工具依序為 (1) 1L 量筒(2) 批次式光柵沉降管柱 (B-LGSC) (3) 連續式光柵沉降管柱 (C-LGSC)。如圖 6 所示，1L 量筒的成效評估指標有 2：(1) 初始沉降速度 (2) 放流水質。沉降速度的測量方式，是於 1L 量筒內倒入 MLSS，沉降 30 分鐘後，以目視判讀特定時間點之污泥層沉降高度，繪出沉降界面高度對沉降時間曲線圖，再求得初始沉降速度，另於沉降試驗後，採取樣品，檢測懸浮固體與化學需氧量，由於 1L 量筒內徑小 (約 6 cm)，易產生管壁效應，低估污泥之沉降速度，高估載體之改善成效，本研群乃研發新式污泥沉降工具。

圖 7 為本研究群於早期參考 Standard Methods^[15]之 SVI 檢測法，所開發之批次光柵沉降管柱，設計規格如下：有效高度 100 cm、內徑 12 cm、攪拌速度 4 rpm，光柵波長 690 nm，監測總長 45 cm、測點間距離 10 mm。此外各光點可獨立發射、接收，光源不會互相干擾，管柱內徑長為 1L 量筒 (6.2 cm) 的 2 倍，可減少管壁效應，有較高沉澱區及機械攪拌棒，以模擬活性污泥於處理廠終沉池的沉降情形，至於沉降數據的取得則透過電腦驅動之光柵，以光學原理自動監測污泥沉降界面，

初始沉降速度的推算與 1L 量筒相似。

本研究群^[11]將載體嵌合技術應用於造紙廢水活性污泥，使用 1L 量筒為試驗工具，添加載體進行批次沉降試驗，評估污泥沉降改善成效。結果指出，當載體劑量由 0 增至 43 % 時，初始沉降速度由 0.027 增至 0.093 cm/min，提升 244 %，且添加載體可提升 COD 去除率 1 ~ 11 %，並建議添加重量比應低於 20 %，避免產生過量污泥。本研究群^[12]進一步自行開發光柵式沉降管柱(light grid settling column, LGSC)，並進行上述的評估，結果顯示當添加重量比由 0 增至 42 % 時，若不扣除稀釋效果，初始沉降速度由 0.41 增至 0.53 cm/min，增加 127 %，若扣除稀釋效應，載體貢獻仍貢獻 76.9 ~ 92.9 %，但隨著重量比愈高，載體貢獻比愈小，且上澄液之 SS 及 COD 濃度改善極微，建議較佳之載體重量比應低於 10 %。

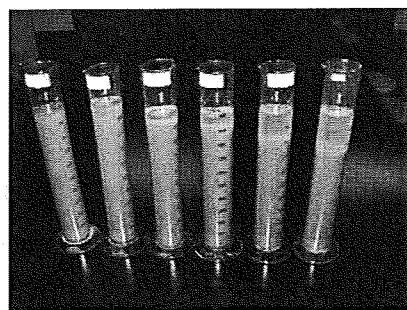


圖 6a 量筒批次沉降試驗

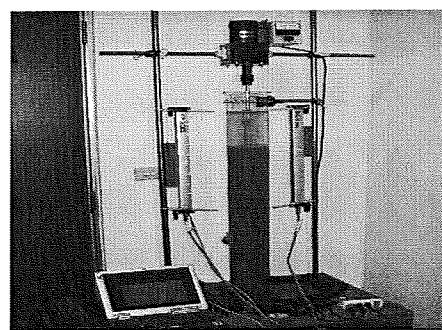


圖 6b 批次光柵管柱沉降

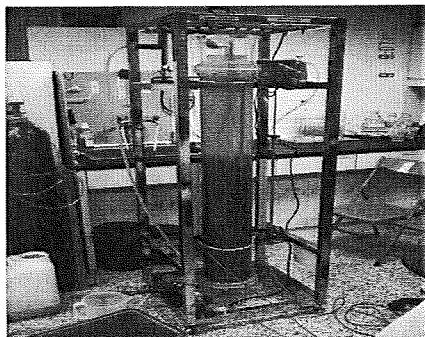


圖 6c 連續光柵沉降管柱

具備開發批次沉降管柱經驗後，本研究群再進行連續式沉降管柱的開發，期能模擬實場終沉池操作，更準確評估載體嵌合技術之成效，與批次沉降管柱比較，連續式沉降管柱同樣以光柵測量沉降數據，但管柱本身乃參考實廠終沉池溢流率與堰負荷率設計，除內徑加長至 20cm，為 B-LGSC 的 2 倍外，管柱有效高度亦增加至 146 cm，並配備可調速式攪拌手，可有效降低管壁效應，此外最特殊之處為連續進流的設計，具有進流管以及溢流堰設計，並配備污泥進流幫浦，能完整模擬實場終沉池操作。

3.2.5 商業進轉技術

許多文獻報導美國 Kruger 公司所研發之載體混凝處理程序 Actiflo，現為市場上被廣為應用的載體混凝技術之一，但主要應用於淨水的處理，處理流程如圖 9 所示，水體流入槽體後，先移除大型顆粒，再進入主要處理單元，並分成 3 階段，首先添加助凝劑，經過短暫混合後，再加入高分子膠凝劑，最後再加入細砂，以特定攪拌速度進行混合；第 2 階段為熟成期，此階段形成載體膠羽，增加膠羽大小及密度；第 3 階段於終沉池中進行重力沉降，後續可進行第三級處理或直接放流，含有載體之污泥自終沉池底部回收，導入水力旋流分離器 (hydrocyclone)，藉由離心方式分離載體與污泥，分離載體之後再導入 Actiflo 程序回收再使用，污泥則進行後續脫水處理。

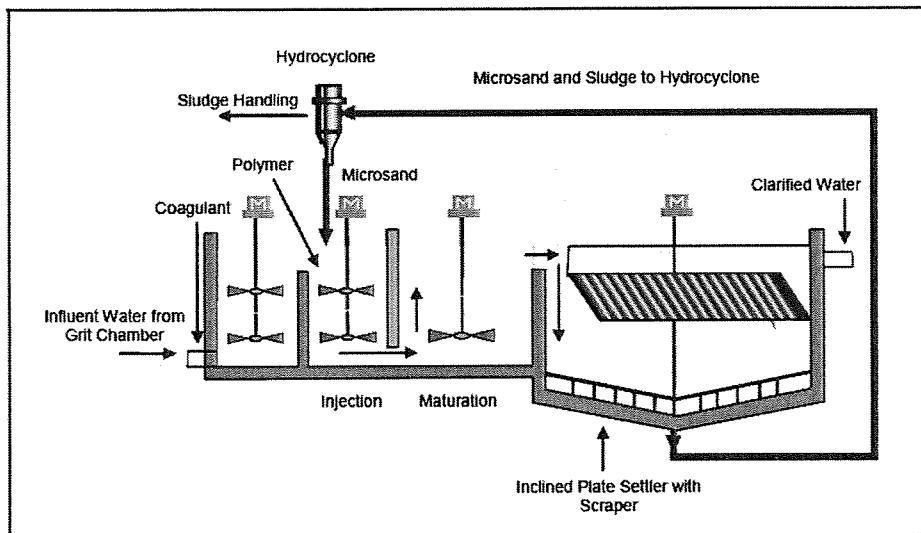


圖 9 Actiflo 載體混凝技術處理流程^[17]

Actiflo 處理程序的優點為：減少處理廠所需的面積、降低土地成本、適用於不同水利條件且不影響處理效率^[9]、減少化學藥劑用量、及降低濁度^[4]，除了應用於淨水或廢水的處理，最近亦應用於處理暴雨時溢流污水^[16]，具有廣泛的應用領域。但 Actiflo 處理程序亦有其缺點，起傳統處理方法，需要更專業的判斷及操作，其次為載體經由幫浦回流進行回收時，常造成載體的損害，尤其是應用於 CSO 的處理時，常需補充載體，且無法完全回收。Jeschke^[4]指出，每處理 100 萬加侖水量時，會損失 8 磅 (3.62 kg) 載體，因此需持續補充載體而提高操作成本，再者 Actiflo 處理程序需數小時，方能達到穩定的處理效率，且會受降雨影響處理效率，應用於 CSO 上尚未有長期確認之效果。

四、結論與建議

本研究針對載體混凝相關文獻與本研究群前期研究成果進行分析、探討後，可得出以下結論與建議：

1. 載體混凝的應用處理範圍廣泛，跨及淨水、工業、生活廢水等領域。
2. 本研究群提議的載體嵌合技術與載體混凝技術間，最大差異為載體與粒徑的不

同，本研究群所用載體為不需回收之小粒徑(1 ~ 10 徑)，而載體混凝載體為需回收之大粒徑(38 ~ 600 徑)，可直接嵌入生物膠羽結構中的理論，較符實驗觀察結果。

3. 載體技術對於活性污泥沉降性有正面改善效果，包括濁度 (0.60降至0.036)、SVI (280降至160 mL/g)、SSVI (60降至44 mL/g)，改善程度依污泥種類、載體特性、混凝劑量、膠凝劑量的差異而不同，且與載體劑量呈正相關。
4. 本研究群針對造紙廢水活性污泥進行研究，結果顯示載體嵌合技術可改善污泥沉降性 (127 ~ 244 %)。
5. 文獻上採用的載體種類、處理水體、試驗方法與評估指標十分多元，欲直接評比成效差異，並不容易，且直接於處理場進行評估有相當風險，因此尚需建立準確且一致的試驗工具和評估方法。
6. 理想載體混凝商轉技術需考量：具瞬間及長期穩定的改善效果、處理效果不易受氣候改變影響、應用水體種類廣泛、有效降低處理成本、能應用於現存的水體處理系統。

五、參考文獻

1. Sibony, J. Clarification with microsand seeding: a state of the art, *Water Research* 1981;15:1281-290.
2. Metcalf and Eddy, Inc. *Wastewater Engineering: Treatment Disposal/Reuse*, 4th Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, USA., 2003.
3. Clauss F, Balavoine C, Helaine D, Martin G. Controlling the settling of activated sludge in pulp and paper wastewater treatment plants. *Water Science and Technology* 1999;40:223-229
4. Jeschke R, Hansen D. Plant adds capacity: improves water quality. *Water World* 1999.
5. Vanderhasselt A, Fuchs A, Vanrolleghem P, et al. Monitoring of the effect of additives on sludge separation properties by using sensors. *Water Environment Research* 1999;71:355-362.

- 6.Vanderhasselt A, Verstraete W. Short-term effects of additives on sludge sedimentation characteristics. Water Research 1999;33:381-390.
- 7.Seka AM, Wiele TVD, Verstraete W. Feasibility of a multi-component additives for efficient control of activated sludge filamentous bulking, Water Research 2001;35:2995-3003.
- 8.Desjardins C, Koudjonou B, Raymond, D. Laboratory study of ballasted flocculation. Water Research 2002;36: 744-754. Young JC, Edwards FG. Factors affecting ballasted flocculation reactions. Water Environment Research 2003;75:263-272.
- 9.Kessler C. Microsand ballasted flocculation and clarification: effect on removal of TSS, oil, grease and metals from a steel mill waste stream. Water Environment Federation 2002
- 10.Young JC, Edwards FG. Factors affecting ballasted flocculation reactions. Water Environment Research 2003;75:263-272.
- 11.蔡傑寧：以量筒沉降試驗評估載體混凝技術之可行性研究。朝陽科技大學環境工程與管理系研究所碩士論文，臺中，2004。
- 12.江舟峰、陳恆揚、吳勇興，以載體嵌合技術改善造紙廢水活性污泥沉降性之研究。第十屆海峽兩岸環境保護學術研討會，2005。
- 13.Vanrolleghem P, Vanderschueren D, Krikilion G, Grijspeerdt K, Willem P, Verstraete W. On-line quantification of settling properties with in-sensor-experiments in an automated settlometer. Water Science Technology 1996;33:37-51.
- 14.Fuchs A, Staudinger G. Characterising the clarification of the supernatant of activated sludge. Water Research 1999;33:2527-2534
- 15.American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 20th edition. Washington DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation.,1998.

16. Sampley WE, Sullivan WD. No longer under the weather. Polluting engineering 2002:24-27.
17. US Filter Kruger, 2000. Design information on the Actiflo® process for wastewater.
18. 陳建安，以光柵式沉降管柱評估載體嵌合技術應用於活性污泥程序之研究。中國醫藥大學環境醫學研究所碩士論文，臺中，2007。

謝 誌

本文係長期研究成果，感謝初期朝陽科技大學的資助，其後期國科會之資助，及廠商永豐餘公司成功廠的協助。感謝 3 位碩士生的接續努力：蔡傑寧、陳恆揚及陳建安。